

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА С ДВУНАПРАВЛЕННЫМ ПОТОКОМ ЭНЕРГИИ

Г. Г. ЖЕМЕРОВ, Д. С. КРЫЛОВ, А. В. МАШУРА*

кафедра промышленной и биомедицинской электроники, НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА

*e-mail: artemmashura94@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Для улучшения электромагнитной совместимости систем электроснабжения метрополитена с питающей сетью целесообразно организовать двунаправленный обмен энергией между источником и нагрузкой. В данной статье рассмотрена структура системы электроснабжения метрополитена с четырехквadrантным приводом постоянного тока на основе шестипульсного мостового управляемого выпрямителя, создана её MatLab-модель, разработана система управления мостами выпрямителя с алгоритмом раздельной работы, предложена система авторегулирования на базе двухконтурного подчиненного регулятора тока-скорости и рассчитаны её параметры. При проведении виртуального эксперимента удалось с высокой точностью отработать график движения электропоезда между станциями, обеспечить режим рекуперации электроэнергии в режиме торможения, получить данные, необходимые для расчёта энергетических показателей такой системы. Полученная модель позволит исследовать энергоэффективность системы электроснабжения метрополитена при различных режимах работы и параметрах линии питания.

Ключевые слова: система электроснабжения; энергия; система авторегулирования; коэффициент полезного действия; рекуперация энергии

MODELING OF THE ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM OF METROPOLITEN WITH A BI-DIRECTIONAL ENERGY FLOW

G. ZHEMEROV, D. KRYLOV, A. MASHURA

department of industrial and biomedical electronics, NTU "KPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT. In order to improve the electromagnetic compatibility of the power supply systems of the metro with the supply network, it is advisable to organize a bi-directional exchange of energy between the source and the load. This article describes the structure of the metro power supply system with a four-quadrant DC drive based on a six-pulse bridge controlled rectifier, created its MatLab model, developed a control system of rectifier bridges with a separate operation algorithm, proposed an auto-regulation system based on a dual-circuit slave current-speed controller and calculated its parameters. When conducting a virtual experiment, it was possible to repeat schedule of movement of the electric train between the stations with high accuracy, to ensure the mode of energy recovery in the braking mode, to obtain the data necessary for calculating the energy performance of such a system. The resulting model will allow to investigate the energy efficiency of the metro power supply system at different operating modes and power line parameters.

Keywords: power supply system; energy; autoregulation system; efficiency; energy recovery

Введение

Метрополитен обеспечивают значительную часть пассажирских перевозок современных городов. До сих пор во многих его системах электроснабжения используются приводы постоянного тока с последовательным возбуждением [1]. Они обладают относительно низкой энергоэффективностью, в том числе из-за невозможности обеспечить двунаправленный обмен энергией между источником и нагрузкой. Невозможность рекуперации энергии состава в режиме торможения в сеть является общей проблемой используемых в метрополитене электроприводов [2].

Одним из возможных решений данной проблемы является использование реверсивного электропривода постоянного тока на основе четырёхквadrантного тиристорного выпрямителя. Он позволяет обеспе-

чить требуемый уровень напряжения контактного рельса и организовать рекуперацию энергии в питающую сеть. Однако эффект повышения коэффициента полезного действия системы электроснабжения метрополитена (СЭ МП) при этом не очевиден и для его оценки требуется создание и всестороннее исследование её математической модели [3].

Цель работы:

Создание математической модели системы электроснабжения метрополитена с двунаправленным потоком энергии на основе четырёхквadrантного привода постоянного тока, синтез его системы управления и авторегулирования, расчёт параметров.

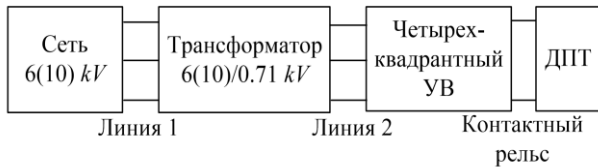


Рис. 1 – Эквивалентная схема СЭ МП

Описание эквивалентной СЭ МП

На рис.1 приведена структурная схема системы электроснабжения метрополитена с четырехквандрантным реверсивным управляемым выпрямителем. Её основными составляющими являются: питающая сеть переменного напряжения уровня 6(10) kV; линия 1, которая соединяет тяговую подстанцию и трехфазный преобразовательный трансформатор 6(10) kV/0.71 kV, соединённый линией 2 с шестипульсным четырехквандрантным мостовым управляемым выпрямителем; нагрузка представлена двигателем постоянного тока с независимым возбуждением. Параметры линии от управляемого выпрямителя до ДПТ учтены сопротивлением контактного рельса, параметры сети, линии 1, линии 2 учтены активными сопротивлениями и индуктивностями.

Для моделирования нужно задаться графиком движения поезда, имеющим четыре интервала: интервал разгона от нулевой до номинальной скорости, время $t_{ac} - 35$ s; время торможения от номинальной до нулевой скорости, $t_{br} - 25$ s; интервал стоянки поезда, время $t_{st} - 30$ s; интервал движения с номинальной скоростью, $t_{mov} - 120$ s.

Описание MatLab-модели приведенной СЭ МП

Для экспериментальной проверки теоретических предположений была разработана MatLab-модель СЭ МП с четырехквандрантным управляемым выпрямителем, соответствующая схеме, приведенной на рис.1.

Параметры элементов силовой цепи в модели были заданы в соответствии с данными СЭ МП, полученными ранее в [2]. Был выбран двигатель типа NP800KS. Механическая часть электропривода была приведена к ротору машины постоянного тока независимого возбуждения, а кинетическая энергия, запасаемая составом при движении – к энергии эквивалентного маховика. Исходные параметры схемы приведены в табл.1

Таблица 1 – Параметры рассматриваемой СЭ МП и их значения.

Параметр	Значение
Сеть:	
Сопротивление фазы источника, Ом, R_0	0.1
Индуктивность фазы источника, мГн, L_0	1.9
Линия 1 (1 км):	
Сопротивление фазы линии 1, Ом, R_1	0.3
Индуктивность фазы линии 1, мГн, L_1	1
Трансформатор 6(10)/0.71 kV (ТСЗП-2500/10У3):	
Напряжение первичной обмотки, В, U_1	6000
Номинальное линейное напряжение вентильной обмотки, В, $U_{2ли}$	710
Потери короткого замыкания, кВт $\Delta P_{к.з.}$	25
Линия 2 (50 м):	
Сопротивление фазы линии 2, мОм, R_2	0.9
Индуктивность фазы линии 2, мкГн, L_2	50
Сопротивление рельса, мОм, R_{KR}	9
ДПТ (типа NP800KS):	
Номинальный ток, А, I_n	3053
Номинальная мощность, МВт, P_n	2013
Номинальная скорость, об/мин(рад/с), w	579(60.6)
Сопротивление якорной цепи, мОм, R_j	8
Индуктивность якорной цепи, мкГн, L_j	97

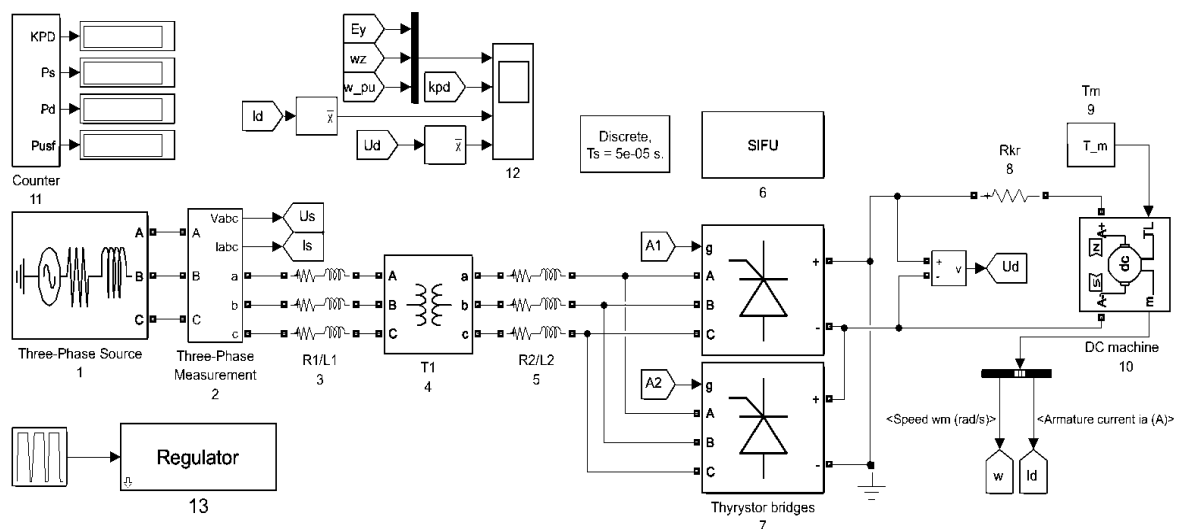


Рис. 2 – MatLab –модель СЭ МП

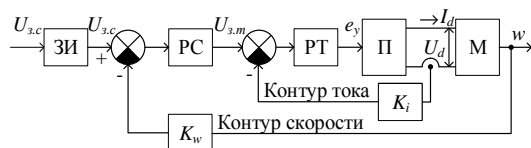


Рис. 3 – Схема регулятора

Система управления выпрямителем построена по вертикальному принципу и имеет арккосинусоидальную характеристику фазосмещающего устройства. Логика переключения мостов отслеживает сигнал задания с выхода регулятора а также мгновенную величину тока нагрузки и, в зависимости от их суперпозиции, переводит управляющие импульсы с одной вентильной группы на другую.

Для оценки влияния двунаправленного потока энергии на коэффициент полезного действия СЭ МП достаточно исследовать движение одного поезда на интервале между подстанциями. При этом появляется теоретическая возможность изменять величину напряжения, подводимого к якору машины постоянного тока независимого возбуждения. Для поддержания заданного графика движения можно использовать регулятор тока-скорости [5]. Такая система авторегулирования выполнена по замкнутому принципу с использованием двухконтурного подчиненного регулятора тока-скорости, настроенного на технический оптимум. Это обеспечивает качественное поддержание заданной скорости в соответствии с графиком движения поезда.

Структурная схема САР, приведенная на рис.3, имеет два контура регулирования:

1. Первый (внутренний) – контур регулирования тока якоря ДПТ, содержащий регулятор тока РТ, преобразователь П (УВ), якорную цепь ДПТ – М и жесткую ООС по току якоря с коэффициентом передачи K_i ;

2. Второй (внешний) – контур регулирования угловой скорости ДПТ, содержащий регулятор скорости РС, первый контур, ДПТ – М и жесткую ООС по скорости с коэффициентом передачи K_w . Задающими сигналами для второго контура является сигнал задания угловой скорости $U_{z.c.}$, проходящий через задатчик интенсивности ЗИ, а для первого – сигнал с выхода РС – $U_{z.m.}$.

При построении такого регулятора в среде *MatLab* основной задачей является расчет пропорционального и интегрального коэффициентов усиления регуляторов скорости и тока. Для этого следует учесть параметры электрической машины, суммарного эквивалентного сопротивления и индуктивности контура протекания тока якоря.

Расчет параметров электрической машины

Исходные параметры для расчетов берутся из табл. 1.

Определим номинальный момент ДПТ по формуле:

$$M_n = c \cdot I_n, \quad (1)$$

где c – конструктивный коэффициент ДПТ:

$$c = \frac{U_n - I_n \cdot R_j}{w} = \frac{825 - 3053 \cdot 0.008}{60.6} = 13.2. \quad (2)$$

С учетом рассчитанного конструктивного коэффициента ДПТ по (1) определяем значение момента ДПТ и получаем $M_n = 40310 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Кинетическая энергия, запасаемая составом при движении, была приведена к энергии эквивалентного маховика. Выражение для расчёта момента инерции поезда получим из условия равенства энергии движущегося состава и вращающегося эквивалентного маховика для номинальных скоростей. При этом получим следующее выражение:

$$J = \frac{m \cdot V^2}{w^2} = \frac{250000 \cdot 16.7^2}{60.6^2} = 18889.6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (3)$$

где V – номинальная скорость поезда – 60 км/ч (16.7 м/с);

m – масса подвижного состава. Она определяется числом вагонов и количеством пассажиров в каждом вагоне. В среднем масса поезда составляет 250 тонн [1].

Рассчитаем постоянную времени якорной цепи ДПТ:

$$T_m = \frac{J \cdot R_j}{c^2} = \frac{18889 \cdot 0.008}{13.2^2} = 866.8 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \quad (4)$$

Расчет суммарного эквивалентного сопротивления

При расчете коэффициентов усиления регулятора необходимо учесть все активные сопротивления и индуктивности, присутствующие в схеме. Рассчитаем суммарное эквивалентное сопротивление:

$$R_e = R_0' + R_1' + R_{TV} + R_2 + R_{np} + R_{к.р.} + R_j, \quad (5)$$

где R_0 – сопротивление фазы источника переменного напряжения 6(10) kV, приведенное ко вторичной обмотке преобразовательного трансформатора (ПТ);

R_1' – сопротивление фазы участка линии 1, приведенное ко вторичной обмотке ПТ;

R_{TV} – суммарное сопротивление фазы ПТ;

R_{np} – сопротивление УВ;

Для приведения R_0' и R_1' ко вторичной обмотке трансформатора необходимо воспользоваться формулой:

$$R_0' = k R_0, \quad (6)$$

где $k=1/k_{тр}^2$ – коэффициент приведения параметров элементов первичной обмотки преобразовательного трансформатора ко вторичной, равный

0.014. Значение сопротивления R_0' равно 1.4 мОм. Аналогичным способом рассчитывается и сопротивление фазы линии 1 – R_1' , которое равно 4.2 мОм.

Суммарное сопротивление фазы трансформатора найдем по методике [6]. Для этого определяем сопротивление трансформатора в относительных единицах:

$$R_{pu} = \frac{\Delta P_{к.з.}}{2 \cdot P_n} = \frac{25000}{2 \cdot 2013000} = 6.2 \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Теперь можем определить относительное сопротивление вторичной обмотки трансформатора:

$$R_{TV} = \frac{R_{pu} \cdot U_{2лн}^2}{P_n} = \frac{6.2 \cdot 10^{-3} \cdot 710^2}{2013000} = 1.56 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (8)$$

Поскольку $R_{TV} = R_{ITV}$ суммарное сопротивление фазы трансформатора R_{TV} :

$$R_{TV} = 2 \cdot R_{ITV} = 3.12 \text{ мОм}. \quad (9)$$

Эквивалентное активное сопротивление четырехквadrантного УВ R_{np} вычисляется по формуле:

$$R_{np} = \frac{e_k \cdot U_{d0}}{2 \cdot I_n} = \frac{0.065 \cdot 916.7}{2 \cdot 3053} = 9.8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \quad (10)$$

где e_k – относительное напряжение короткого замыкания ПТ, по справочнику оно равно 6.5%.

U_{d0} – напряжение идеального холостого хода:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2лн} = 958 \text{ В}. \quad (11)$$

Все составляющие суммарного эквивалентного сопротивления известны, по (5) его значение равно 36.5 мОм.

Расчет суммарной индуктивности якорной цепи

Суммарная индуктивность якорной цепи ДПТ:

$$L_e = L_0 + L_1 + L_{TV} + L_2 + L_j, \quad (12)$$

где L_{TV} – суммарная индуктивность фазы трансформатора 6(10)/0.71 kV;

Для расчета суммарной индуктивности фазы трансформатора вначале рассчитаем индуктивность трансформатора в относительных единицах:

$$L_{pu} = \frac{e_k}{2} = \frac{0.065}{2} = 0.033 \quad (13)$$

Индуктивность вторичной обмотки фазы трансформатора:

$$L_{2TV} = \frac{L_{pu} \cdot U_{2лн}^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot P_n} = \frac{0.033 \cdot 710^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 2013000} = 25.9 \text{ мкГн}. \quad (14)$$

Суммарная индуктивность трансформатора:

$$L_{TV} = 2 \cdot L_{2TV} = 2 \cdot 25.9 \cdot 10^{-3} = 51.8 \text{ мкГн}. \quad (15)$$

Все составляющие суммарной индуктивности якорной цепи ДПТ известны, по (12) ее значение равно 3 мГн.

Расчет передаточных коэффициентов цепи ООС и коэффициентов усиления ПИ-регуляторов

Для определения передаточных коэффициентов зададимся коэффициентом усиления датчиков обратной связи k_u равным 1 и амплитудой опорного напряжения СИФУ $U_{on} = 1$ В. Тогда коэффициент передачи обратной связи по току

$$k_I = \frac{k_u}{I_n} = \frac{1}{3053} = 327.5 \cdot 10^{-6}; \quad (16)$$

коэффициент передачи обратной связи по скорости

$$k_w = \frac{k_u}{w} = \frac{1}{60.6} = 0.016; \quad (17)$$

коэффициент передачи УВ

$$k_n = \frac{U_{d0}}{U_{on}} = \frac{916.7}{1} = 916.6. \quad (18)$$

Расчет параметров регулятора тока. Интегральный коэффициент усиления регулятора тока:

$$K_{iu} = \frac{R_e}{2 \cdot T_i \cdot k_i \cdot k_n} = 18.219. \quad (19)$$

где T_i – малая некомпенсируемая постоянная времени равна 0.0033 с.

Пропорциональный коэффициент усиления регулятора тока равен:

$$K_{ip} = \frac{K_{iu} \cdot L_e}{R_e} = \frac{18.2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{0.036} = 1.523. \quad (20)$$

Расчет параметров регулятора скорости

Пропорциональный коэффициент усиления регулятора скорости:

$$K_{wp} = \frac{T_m \cdot k_i \cdot c}{4 T_i \cdot R_e \cdot k_w} = \frac{0.87 \cdot 327.5 \cdot 10^{-6} \cdot 13.2}{4 \cdot 0.003 \cdot 0.036 \cdot 0.016} = 467.46, \quad (21)$$

где T_m – постоянная времени якорной цепи ДПТ, рассчитанная ранее по (4).

Интегральный коэффициент усиления регулятора скорости:

$$K_{wi} = \frac{K_{wp}}{8 \cdot T_i} = \frac{467.46}{8 \cdot 0.003} = 17529.763. \quad (22)$$

Результаты моделирования

На рис.4 приведены машинограммы работы *MatLab*-модели, показывающие цикл движения электропоезда между станциями. На рис.4,а сплошная линия отображает задание скорости в относительных единицах, а штриховая линия – скорость, которую реально обрабатывает ДПТ. Значению номинальной скорости соответствует напряжение на контактном рельсе, равное 825 В (рис.4,б). В режиме торможения, на интервале t_{br} ток нагрузки меняет направление (рис.4,в) и энергия возвращается в сеть, о чём свидетельствует изменение знака активной мощности на стороне питающей сети (рис.4,г).

В результате математического моделирования показано, что предложенная система с высокой точностью обрабатывает заранее заданный график движения электропоезда между станциями, поддерживая требуемую величину скорости на всех интервалах. Перерегулирования и колебания по заданным параметрам практически отсутствуют, что свидетельствует о корректности выбора структуры и расчёта параметров используемой системы автоматического регулирования.

Предложенная модель также позволяет получить все необходимые данные для расчета энергетических показателей СЭ МП для различных режимов её работы.

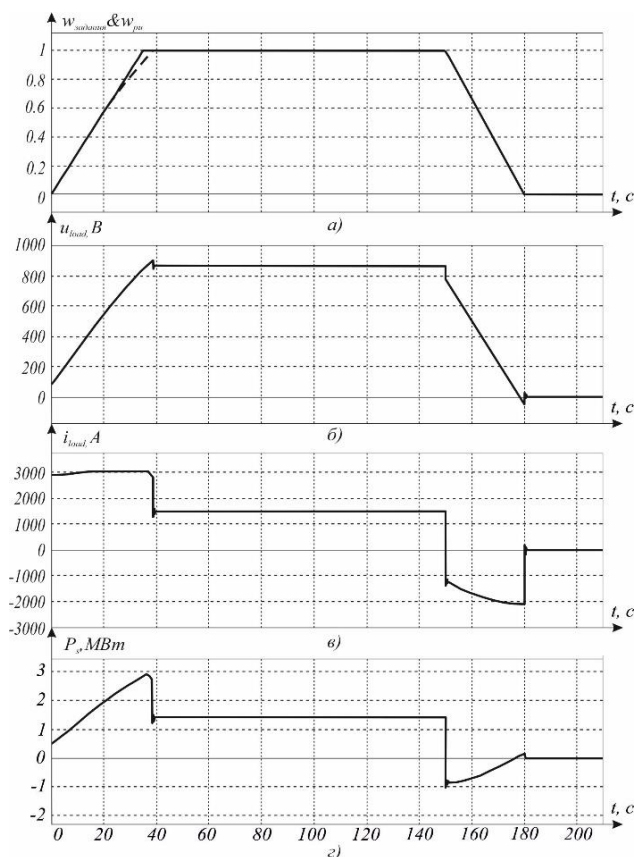


Рис. 4 – Машинограммы работы *MatLab*-модели

Выводы

1. Создана математическая модель СЭ МП с двуправленным потоком энергии.

2. Разработана и приведена методика расчета параметров системы авторегулирования и коэффициентов усиления регулятора для выбранной структуры СЭ МП.

3. Построена система управления преобразователем, которая дает возможность изменять в широких рамках диапазон параметров рассматриваемой эквивалентной схемы и добиться заданного графика скорости движения поезда.

Список литературы

1. Электровагоны типов 81-718/719, 81-718.0/719.0 [Online]. Available: <http://vagon.metro.ru/passenger/81-718.html>.
2. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В., Холод О.И. Энергоэффективность систем электроснабжения подвижного состава метрополитена // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – №.1. – С. 67–74.
3. Жемеров Г.Г., Ильина Н.О., Машура А.В. Энергоэффективность рекуперативного гальмування в системах електропостачання з регульованими електроприводами // *Технічна електродинаміка* – 2018. – №.6. – С. 73-76.
4. Жемеров Г.Г., Ильина Н.О., Тугай Д.В., Холод О.И. Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2013. – №.1. – С. 41–49.
5. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода // *Учебник для вузов*. – М.: Энергоиздат. – 1981. – №.6 – С. 576.
6. Perelmuter V. Electrotechnical Systems: Simulation with Simulink. // *CRC Press*, 2018, 62–64.
7. Щербак Я. В., Нерубацький В. П. Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України // *Залізничний транспорт України*. – 2011. – №.2. – С. 30-34.
8. Саблин О. И. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта // *Вісник НТУ «ХПИ»*. – 2013. – №.38. – С. 187-190.
9. Alias A., Rahim N., Hussain M. Bidirectional three phase power converter // *IEEE First conference on clean energy and technology CET*, 2011, 337-341.
10. Clare J.C. Bidirectional Power Converter for Voltage Fed Inverter Machine Drives // *Proceeding of the 23th Power Conference, Toledo, Spain*, 1992, 189-194.
11. Костин Н. А., Никитенко А.В. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока // *Залізничний транспорт України*. – 2014. – №.3. – С. 15–23.
12. Тугай Д.В., Жемеров Г.Г. Стабілізація напруги контактної мережі для підвищення енергоефективності системи електричної тяги постійного струму // Д.В. Тугай, Г.Г. Жемеров / *Технічна електродинаміка*. – Київ, 2018. – №5. – С. 88-91.

References (transliterated)

1. Electrocar types 81-718 / 719, 81-718.0 / 719.0 [Online]. Available: <http://vagon.metro.ru/passenger/81-718.html>.
2. **Zhemerov G.G., Tugay D.V., Kholod O.I.** Energy efficiency of power supply systems of a rolling stock of the subway // *Technichna elektrodinamika*, 2014, **1**, 67–74.
3. **Zhemerov G., Ilina N., Mashura A. Tugay D.** Energy efficiency of recuperative braking in power supply systems with regulated electric drives // *Technichna elektrodinamika*, 2018, **6**, 73–76.
4. **Zhemerov G.G., Ilina N.A., Tugay D.V., Kholod O.I.** Subway power supply systems with modern semiconductor converters and energy storage // *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2013, **1**, 41–49.
5. **Chilikin M., Sandler A.** Obshhiy kurs jelektroprivoda // *Uchebnik dlja vuzov*. – M.: Jenergoizdat, 1981, **6**, 576 p.
6. **Perelmutter V.** Electrotechnical Systems: Simulation with Simulink. // *CRC Press*, 2018, 62–64.
7. **Shcherbak Ya. V., Nerubatsky V. P.** Analysis of the use of recuperative inhibition on the railways of Ukraine // *Railway transport of Ukraine*, 2011, **2**, 30–34.
8. **Sablin O. I.** Analiz kachestva rekuperiruemoy jelektro-jenergii v sisteme jelektricheskogo transporta // *Visnik NTU «HPI»*, 2013, **38**, 187–190.
9. **Alias A., Rahim N., Hussain M.** Bidirectional three phase power converter // *IEEE First conference on clean energy and technology CET*, 2011, 337–341.
10. **Clare J.C.** Bidirectional Power Converter for Voltage Fed Inverter Machine Drives // *Proceeding of the 23th Power Conference, Toledo, Spain*, 1992, 189–194.
11. **Kostin N.A., Nikitenko A.V.** Autonomy of recuperative braking – the basis of reliable energy-efficient recovery on the electromotive force constant current // *Zaliznychnyy transport Ukrainy*, 2014, **3**, 15–23.
12. **Tugay D.V., Zhemerov G.G.** Stabilization of contact contacts for measures for energy efficiency of a system and electric power of a post stream // D.V. Tugay, G.G. Zhemerov / *Tekhnichna elektrodinamika*. – Kyiv, 2018, **5**, 88–91.

Сведения об авторах (About authors)

Жемеров Георгий Георгиевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры промышленная и биомедицинская электроника, Харьков, Украина; ORCID 0000-0000-0002-3469-0121 email: zhemerov@gmail.com.

George G Zhemerov. – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", professor of industrial and biomedical electronics, Kharkov, Ukraine, ORCID 0000-0000-0002-3469-0121

Крылов Денис Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры промышленной и биомедицинской электроники, г. Харьков, Украина; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: denis77ks@gmail.com.

Denis S Krylov. – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: denis77ks@gmail.com.

Машура Артем Вячеславович – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры промышленная и биомедицинская электроника, Харьков, Украина; ORCID 0000-0002-6016-7801, email: artemmashura94@gmail.com.

Artem V. Mashura – graduate student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", a graduate student of department of industrial and biomedical electronics, Kharkov, Ukraine; ORCID 0000-0002-6016-7801

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Жемеров, Г. Г. Моделирование системы электроснабжения метрополитена с двенаправленным потоком энергии / **Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, А. В. Машура** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: *Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 72–77. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.10.

Please cite this article as:

Zhemerov, G., Krylov, D., Mashura A. Modeling of the electrical supply system of metropoliten with a bi-directional energy flow. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 72–77, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.10.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Жемеров, Г. Г. Моделювання системи електропостачання метрополітену з двонаправленим потоком енергії / **Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, А. В. Машура** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Електричні машини та електро механічне перетворення енергії*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 72–77. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.10.

АНОТАЦІЯ. Для поліпшення електромагнітної сумісності систем електропостачання метрополітену з мережею живлення доцільно організувати двонаправлений обмін енергією між джерелом і навантаженням. У даній статті розглянута структура системи електропостачання метрополітену з чотириквadrantний приводом постійного струму на основі шестипульсного мостового керованого випрямляча, створена її MatLab-модель, розроблена система управління мостами випрямляча з алгоритмом роздільної роботи, запропонована система авторегулювання на базі двоконтурного підпорядкованого регулятора струму-швидкості та розраховані її параметри. При проведенні віртуального експерименту вдалося з високою точністю відпрацювати графік руху електропоїзда між станціями, забезпечити режим рекуперації електроенергії в режимі гальмування, отримати дані, необхідні для розрахунку енергетичних показників такої системи. Отримана модель дозволить дослідити енергоефективність системи електропостачання метрополітену при різних режимах роботи і параметрах лінії живлення.

Ключові слова: система електропостачання, енергія, система авторегулювання, коефіцієнт корисної дії, рекуперація енергії
Надійшла (received) 20.06.2019